

СТРУКТУРА ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА ЧС-70ВИ ПОСЛЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ДЕФОРМАЦИИ

*Давыдов Д.И., Степанова Н.Н., Казанцева Н.В., Виноградова Н.И.,
Ризмант М.Б.*

Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, davidov@imp.uran.ru

Проведено сравнительное исследование структуры, химического состава и магнитных свойств различных зон лопатки из сплава ЧС-70ВИ первой ступени газовой турбины ГТЭ после эксплуатации по экспериментальному режиму. Обнаружено значительное увеличение магнитной восприимчивости в зоне пера лопатки. Показано влияние изменения химического состава лопатки на магнитные характеристики. Наблюдается корреляция между изменением магнитной восприимчивости и изменением плотности дефектов в сплаве.

Целью данной работы является установление связи между появлением ферромагнитных свойств и локальными изменениями концентрации легирующих элементов в лопатках из жаропрочного никелевого сплава после эксплуатации при повышенных температурах.

Жаропрочные никелевые сплавы применяются для изготовления турбинных лопаток стационарных газотурбинных установок, длительно работающих в широких интервалах температур и напряжений. Основными фазами таких сплавов являются твердый раствор на основе никеля и упрочняющая фаза на основе интерметаллида Ni_3Al со сверхструктурой типа L1_2 (γ' -фаза). Кроме интерметаллидной γ' -фазы также присутствуют карбиды (MeC и Me_{23}C_6), которые выделяются на границах и внутри зерен в виде включений.

Лопатки из никелевых жаропрочных сплавов находятся в парамагнитном состоянии. До эксплуатации значение магнитной восприимчивости составляет порядка 10^{-4} . Все фазы сплава как при комнатной температуре, так и в интервале рабочих температур при эксплуатации по стандартному режиму (например, 800°C для сплава ЧС-70ВИ) находятся в парамагнитном состоянии. Однако длительная эксплуатация при повышенных температурах, способствующих высоким скоростям диффузии, при действии вибрационных напряжений и центробежных сил может привести к появлению ферромагнитных свойств. Изменение магнитного состояния в литературе связывают с образованием ферромагнитных окислов на поверхности лопатки или в районе микротрещин.

При исследовании лопатки, работавшей по экспериментальному режиму, наблюдается значительное увеличение магнитной восприимчивости (в 20 раз) на внешней стороне лопатки. На поперечном сечении пера лопатки обнаружено, что величина магнитной

восприимчивости увеличена в 10 раз и снижается при приближении к центру. В средней части лопатки магнитная восприимчивость практически совпадает с исходной.

Структура исследованной лопатки из сплава ЧС-70ВИ за время эксплуатации по экспериментальному режиму подверглась ряду необратимых изменений. В замке лопатки под действием температуры происходит коагуляция частиц γ' -фазы, каких-либо дефектов внутри частиц не наблюдается. В спинке лопатки (выпуклая часть пера), где напряжения максимальны, видны как полосы скольжения, так и сверхструктурные дефекты упаковки.

Поверхность лопаток из жаропрочных никелевых сплавов при взаимодействии с агрессивной средой окисляется. При этом происходит диффузия легирующих элементов из объема сплава к поверхности: хрома, титана, кобальта, никеля и др. с образованием различных сложных оксидов и встречной диффузии в материал лопатки серы и кислорода из среды продуктов сгорания топлива. В результате поверхностный слой сплава становится малопрочным.

Среди всех возможных оксидов, которые могут сформироваться на поверхности жаропрочного никелевого сплава, только с несколькими можно связать увеличение магнитной восприимчивости. Это сложные оксиды, имеющие структуру типа шпинели AB_2O_4 , к которым относятся простые и сложные оксиды железа Fe_3O_4 или Fe_2TiO_4 и кобальта Co_3O_4 или $CoFe_2O_4$. Магнитным является и другой оксид железа: $\gamma\text{-}Fe_2O_3$. Диоксид хрома CrO_2 , имеющий структуру рутила, также является ферромагнетиком. Сильное обогащение поверхности в изучаемом сплаве кислородом, железом, кобальтом и титаном позволяет предположить, что здесь сформировались оксиды именно этих элементов.

Во внутренней части пера лопатки не обнаружено образования оксидов или боридов, с которыми можно было бы также связать изменение магнитных свойств изучаемого в данной работе материала даже при тщательном электронно-микроскопическом исследовании. В структуре сплава наблюдается лишь различие в плотности, а также различие в геометрии дефектов в разных частях поперечного среза пера. Максимальное количество дефектов обнаружено в районе карбидных выделений.

Проведено исследование изменения химического состава по поперечному срезу пера лопатки. В центральной зоне концентрация элементов практически совпадает с исходной. При отходе от центра наблюдаются колебания в процентном содержании никеля (основы) и легирующих элементов: кобальта, титана и хрома, а также изменяется концентрация железа, присутствующего в составе сплава в виде примеси. Наибольшее изменение в химическом составе наблюдается на внешней поверхности спинки пера лопатки. Здесь можно отметить очень высокое

содержание кислорода, железа, кобальта и титана, при этом концентрация легирующих элементов, таких как вольфрам и молибден, снижена, содержание никеля (основы) также снижено более чем в два раза.

Перераспределение химических элементов внутри твердого раствора жаропрочного сплава всегда имеет место при его эксплуатации. При стандартных режимах большинство дефектов кристаллического строения сосредоточено в областях твердого раствора, в то время как внутри частиц интерметаллидной γ' -фазы (Ni_3Al) устойчивых комплексов дефектов не образуется. Именно это обстоятельство обеспечивает выполнение γ' -фазой роли упрочняющей фазы. В таком структурном состоянии после длительной наработки материал во внутренних областях лопатки остается парамагнитным.

Отличие структурного состояния материала лопатки после ее эксплуатации по экспериментальному режиму состоит в том, что внутри частиц интерметаллидной γ' -фазы наблюдается большое количество сверхструктурных дефектов упаковки. Возможно, что за образование таких дефектов отвечает локальное изменение концентрации. При этом множественные сверхструктурные дефекты упаковки взаимодействуют между собой. В местах их пересечения образуются трехмерные V-дефекты. Такие микрообъемы внутри интерметаллида с искаженной кристаллической решеткой могут быть обогащены атомами никеля, кобальта или железа и выступать в роли ферромагнитных кластеров, что проявляется как повышение магнитной восприимчивости жаропрочного сплава после длительного высокотемпературного нагружения.

Таким образом, появление восходящей диффузии атомов в неоднородном поле механического напряжения приводит к обогащению поверхностного слоя материала лопатки атомами с большим ионным радиусом. В поверхностном слое увеличивается концентрация железа, кобальта и титана, при этом концентрация вольфрама и молибдена снижена, также существенно снижено содержание никеля. Повышение магнитной восприимчивости на поверхности лопатки связано с образованием ферромагнитных оксидов железа и хрома.

Повышение магнитной восприимчивости во внутренней части лопатки, при отсутствии формирования новых фаз, по-видимому, связано с локальным изменением химического состава и формированием в местах пересечения дефектов упаковки микрообъемов с искаженной кристаллической решеткой, которые могут выступать в роли магнитных кластеров.

Работа выполнена по бюджетной теме ИФМ УрО РАН «Структура» с частичной финансовой поддержкой гранта РФФИ № 11-02-12189 и проекта Уральского отделения РАН № 12-У-2-1017.